

## 核融合研究における主幹プロジェクトの現状と小型炉への要望 Recent Progress on Nuclear Fusion Research Projects and Demands for Compact Reactor

稲垣 滋

Inagaki Shigeru

九大・応研

Kyushu Univ. RIAM

### はじめに

国際協力のもと ITER の建設が始まり、いよいよ磁場閉じ込めプラズマによる核燃焼実験時代が幕を上げる。ITER は"核融合エネルギーが 科学技術的に成立することを実証する"[1] 事を目的とし、 $Q \geq 10$ , 即ち 50MW の入力により 500MW の核融合出力を生み出す事を目指す。この目的を達成するため、ITER は大半径 6.2 m, 小半径 2.0 m, プラズマ体積  $840 \text{ m}^3$  (LHD は  $30 \text{ m}^3$ ) という巨大な装置となっている。ITER の成功を経て、その成果と経験を活かして核融合発電原型炉 (発電実証プラント), そして商用炉の設計・建設へと進展します。このため ITER 実験は必ず成功させなければならないプロジェクトといえます。ITER の成功とその先の実証炉/商用炉を見据え、ITER を補完するプロジェクトが動いている。その一つである JT-60SA ではより高い Q 値と  $\beta$  値の達成を目指している。

### ITER の設計

ITER の設計には多くの議論があった。ジャイロ流体シミュレーションを基に輸送係数のモデルが作り上げられた。このモデルを用いて ITER 実験を模擬すると、閉じ込めが悪く中心のイオン温度が低く、核融合反応が起きない、との予測がなされた[2]。しかしその後、乱流によりゾーナル流が形成され、効果的に乱流輸送を低減する事が示された。更に実験でゾーナル流の形成が発見されると[3], やっと ITER が期待通りの性能を発揮するという見通しが得られた。

ITER の大きさは閉じ込めスケーリング則と呼ばれる経験則によって設計されている。このスケーリング則は自己点火条件を達成する為には装置をある程度大きくしなければならない、という事を示している。スケーリング則を決めているのはプラズマ乱流が駆動する熱輸

送である、と考えられている。このため装置の小型化のためには、プラズマ乱流熱輸送を理解し、第一原理によるスケーリング則を得る事が重要である。その上で、乱流輸送の低減を議論する事が可能となる。このような状況を鑑み、プラズマ乱流の基礎過程を明らかにする実験が小型の直線プラズマを用いて行われている[4]。乱流揺動をプローブにより同時多点計測し、ストリーマの発見やゾーナル流を駆動するレイノルズ応力の直接計測という成果が得られている [5]。

### ITER の成功と商業炉の実現へ

ITER の建設は始まっているが、設計通りの性能を発揮できるかどうか、より優れた運転シナリオがあるか、未解決の課題の解決、を目指して研究が進められている。ここでは近年のトピックスに関して紹介する。

#### 1. ITER 模擬実験

ITER は電子加熱が主であり、運動量入射が小さく、壁材としてタンゲステンやベリリウム等が使用される予定である。これらの影響を事前に評価する研究が行われている。

#### 2. ELM 制御

核融合出力が時間的に大きく変動し、ダイバータへの熱負荷変動が大きくなる事は好ましくない。このため ELM 制御は喫緊の課題であり、世界中で集中的に研究が行われている。磁気共鳴摂動を用いた制御や I-mode, QH モードといった ELM の小さい運転領域を用いる事等が提案され、議論されている。

#### 3. プラズマ乱流

プラズマ乱流が駆動するゾーナル流が閉じ込め特性に大きく影響するため乱流の多スケール間結合の研究が急速に進展している[6]。また、プラズマ乱流もプラズマの動的振る舞い決めている大きな要因である、その時間スケールを

予測する研究が重要となっている。

#### 4. H-mode物理

ITERではH-modeが標準の運転モードと考えられているため、H-modeが精力的に研究されている。その中でも、L-H遷移のしきい値パワーの密度依存性、同位体効果、ペDESTALやELMに対する不純物の影響が集中的に議論されている。同位体効果の理解に関しては、LHD実験からの新たな知見が期待される。

#### コンパクトな炉を目指して

はじめに述べた様にITERのみでは解決できない課題もあり、ITERを補完するプロジェクトがある。材料問題がそのうちの一つである。核融合炉内の中性子束は加圧水型原子炉のおよそ100倍あり、その損傷量は100 dpaを超える。このような極限環境での使用に適した材料は何か？低放射化フェライト鋼、バナジウム合金、SiC/SiC 複合材料を対象に、合金元素の添加、不純物元素の低減化、さらに熱処理の工夫などが必要である[7]。ITERプロジェクトで様々な材料を試験するのはお金も時間もかかりすぎるため適切な部材の試験はIFMIFで行う[8]。しかし構造材のような大きな部材を長期間、高エネルギーの中性子束に曝す事が出来るような体積中性子源の開発が待たれる。

核融合炉の大きさは実は材料で決まってしまう可能性がある。D-T核反応を考える限り、自己点火条件から生じる中性子の数とエネルギーは決まってしまう。すると中性子束はおおざっぱには装置の小半径と大半径との積に反比例するため、コンパクトな核融合炉を想定すると中性子束は大きくなる。一方で、材料によって耐えられる中性子束の最大値が決まっているためコンパクト化には下限がある。プラズマの閉じ込めを完璧にすると最後は材料によって装置の大きさが決まる。これを克服して炉を小型化するためには他の核反応を用いる等の新しいアイデアが必要となる。

#### まとめ

ITERとそれを取り巻くプラズマ核融合研究について説明した。磁場閉じ込めプラズマ核融合方式はもうすぐエネルギーが取り出せる、という段階に近づいている。更に商用炉でも本方式が採用される可能性が非常に大きい。更にその先の次世代の商用炉では、小型化が議論になるであろう。その際はプラズマ乱流物理の理解に加え、材料試験の知見の蓄積も必要となる。

#### 参考文献

- [1] <http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/iter/index.php>
- [2] W. Dorland, M. Kotschenreuther, G. W. Hammett and ITER forecasts, *Science* 275, 292 (1997).
- [3] A. Fujisawa et. al., *Phys. Rev. Lett.* **93**, 165002 (2004)
- [4] <http://tokusui.riam.kyushu-u.ac.jp/TokusuiWeb/index.html>
- [5] T. Yamada, et. al., *Nature Physics* **4**, 721 (2008)
- [6] S.-I. Itoh et. al., *J. Plasma Fusion Res.* **86**, 334 (2010)
- [7] 長谷川晃他、*日本原子力学会誌* 47, 536 (2005)
- [8] <http://www.naka.jaea.go.jp/BA/>